基于校正WOFOST模型的枣树生长模拟与水分利用评价

白铁成[1*]，王　涛[1]，张楠楠[1,2]

（1. 塔里木大学 信息工程学院/新疆南疆农业信息化研究中心，新疆阿拉尔 843300；
2. 中国农业大学 信息与电气工程学院，北京 100083）

摘　要：为实现定量化分析温、光和水资源对果树生长的影响，本研究以成龄骏枣树为研究对象，提出了基于校正WOFOST模型的枣树生长和水分运移模拟方法。利用2016和2017年的田间试验观测数据，重点校正WOFOST模型的物候学发育、初始化、绿叶、CO_2同化、干物质分配、呼吸作用和水分利用参数。在田间尺度，完成总地上生物量（TAGP）、叶面积指数（LAI）和土壤水分含量的动态模拟和精度验证；在县域尺度，使用55个果园的最大LAI、单产、实际蒸散量（ET_a）和水分利用效率（WUE）数据评价模型区域尺度的模拟性能。结果表明，在田间尺度，校正模型模拟不同灌溉梯度TAGP的决定系数R^2范围为0.92～0.98，归一化均方根误差*NRMSE*为8.7%～20.5%；模拟LAI的R^2范围为0.79～0.97，*NRMSE*为8.3%～21.1%；模拟土壤水分含量的决定系数R^2范围为0.29～0.75，*NRMSE*为4.1%～6.1%。在县域尺度，两年模拟最大LAI与实测LAI的R^2分别为0.64和0.78，*NRMSE*分别为13.3%和10.7%；模拟单产的R^2分别为0.48和0.60，*NRMSE*分别是12.1%和11.9%；模拟ET_a均方根误差分别为36.1 mm（7.9%）和30.8 mm（7.4%）；模型也表现了较高的WUE模拟精度（10%<*NRMSE*<20%），均方根误差*RMSE*值分别为0.23和0.28 kg/m³。WOFOST模型在田间和县域尺度都取得了较高的枣树生长和水分运移模拟精度，可为土壤、气象、灌溉管理和枣树生长耦合影响的定量化分析提供新思路。

关键词：作物生长模型；参数校正；WOFOST；枣树；水分利用效率

中图分类号：S126　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202103-SA008

引用格式：白铁成, 王涛, 张楠楠. 基于校正WOFOST模型的枣树生长模拟与水分利用评价[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(2): 55-67.

BAI Tiecheng, WANG Tao, ZHANG Nannan. Dynamic simulation of jujube tree growth and water use evaluation based on the calibrated WOFOST model[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(2): 55-67. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

红枣富含蛋白质、糖类、维生素和矿物质等营养成分，具有重要的食用和医学价值。中国红枣种植区域主要有新疆、山西、陕西、河北、河南和山东等地区。新疆南部地区光热资源丰富、日照时间长、昼夜温差大，是中国最重要的优质红枣生产基地，年产量372.8万吨，占全国总产量的50%[1]，已成为南疆农民增收和人口聚集的重要支柱产业。然而，新疆地区夏季温度高、蒸发蒸腾量大、干旱少雨，水资源紧缺，如何定量评价蒸散和水分利用效率是干旱区农业节水的关键技术问题。现有关于枣树生长水效应和灌溉管理研究主要集中在灌水处理对产量和品质的影

收稿日期：2021-03-23　修订日期：2021-04-20

基金项目：国家自然科学基金（61501314）；兵团中青年科技创新领军人才项目（2018CB020）

*通讯作者：白铁成（1982—），男，博士，教授，研究方向为作物生长模拟和遥感同化方法。电话：15299409008。E-mail：baitiecheng1983@163.com。

响[2]、管理制度对土壤水分的影响[3]、灌溉模式优化水肥管理[4]、灌溉和施肥对产量的耦合影响[5-7]等。然而，这些研究大多基于田间试验数据，灌溉方案通常只适用于特定土壤和气候环境，无法实现定量化分析灌溉方案对红枣产量和品质的影响。

作物生长模型是基于生理和生态学原理，并使用数学模型量化受气候、土壤和管理条件影响的作物生长发育过程。在过去的几十年中，已经开发的几个比较成熟的作物模型包括WOFOST（WOrld FOod Studies）、DSSAT（Decision Support System for Agrotechnology Transfer）和EPIC（Environmental Policy Integrated Climate）等[8]。这些模型各具特点和优势，但通常都包含了物候学、CO_2同化（光合生产）、呼吸作用、同化物分配和土壤水循环等模块，被广泛应用于农业生产管理以及与社会相关的应用中，如气候变化响应[9]，作物产量预测[10]以及环境、水分和作物生长的耦合作用[11]等。已有的作物生长模型主要聚焦一年生的大田作物，关于果树作物模型研究方面，Fishman和Génard[12]基于水和干物质运输机制开发了桃树果实生长模型，计算干旱和新增质量变化所表示的季节性和昼夜水果生长情况，以分析作物负荷下的水分胁迫条件。Lopez等[13]基于形态学开发了桃树生长的计算机模拟模型，实现桃树生长的三维描述，可用于树木修剪管理。Lescourret等[14]用全局模型解释了雌性和雄性藤的开花、授粉和果实生长之间的关系，并集成了生产管理输入，仿真了果园管理对猕猴桃果实数量和尺寸的影响，该模型对气候和技术操作的变化都很敏感。Green等[15]开发了果树冠层蒸腾和光能截获模型，用于证明蒸腾作用如何响应气象环境的变化，敏感性分析表明，光拦截受叶面积和叶光学特性变化的影响最大，而蒸腾作用受叶面积和叶电导变化的影响最大。Costes等[16]使用混合随机和生物力学模型模拟了果树发育。

然而，已报道的果树生长模型缺少生理生化过程的机理性描述。WOFOST是一种机理模型，可以根据物候学、CO_2同化、蒸腾作用、呼吸作用以及这些过程如何受环境条件影响来解释作物生长[8]。该模型的过程描述是通用的，通过参数校正可用于不同作物的生长模拟[17]和水分限制产量评估[18]，不仅被广泛用于定量分析一年生大田作物的生长过程[8]，而且具有枣树生长模拟和产量评估的潜力[19]。基于WOFOST实现多年生果树作物的水分限制生长模拟，进而实现土壤、气象、灌溉管理和果树作物生长耦合影响的定量化分析，有望使果树灌溉管理从试验统计分析迈入定量、机理性描述阶段。因此，本研究以矮化密植骏枣为研究对象，在WOFOST模型作物参数校正基础上，实现枣树生长和水分运移模拟过程。并使用大田试验测量的总地上生物量（Total Above-Ground Production，TAGP）、叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）和土壤水分含量验证田间尺度的模拟精度；使用县域尺度测量的55个果园的最大叶面积指数、单产、实际蒸散量和水分利用效率评价校正WOFOST模型在县域尺度不同枣园的模拟性能。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区阿拉尔市（80°30′E—81°58′E，40°22′N—40°57′N），红枣种植面积约4.5万公顷，约占全国红枣产量的1/8。属于暖温带极端大陆性干旱荒漠气候，2016年和2017年平均降雨量分别为106和98 mm，主要分布在夏季，太阳辐射年均133.7～146.3 kcal/cm^2，年均日照2556.3～2991.8 h，年平均气温在10.8～12.5 ℃之间，最大日温差为20 ℃。丰富的光热资源为优质红枣种植提供了良好的自然条件。

2.2 试验设计

在田间试验区域（图1蓝色方块定位区域）选择成龄枣园在2016和2017年开展灌溉试验，采用滴灌方式在生育期设计5个灌溉梯度（不包

括冬灌和春灌）：灌溉定额CK（375 mm，D1）、90% CK（338 mm，D2）、80% CK（300 mm，D3）、70% CK （263 mm，D4） 和 60% CK（225 mm，D5）。灌溉定额参考了当地经验灌溉量，生长季灌溉10次，各小区施肥量和其他农艺措施相同。

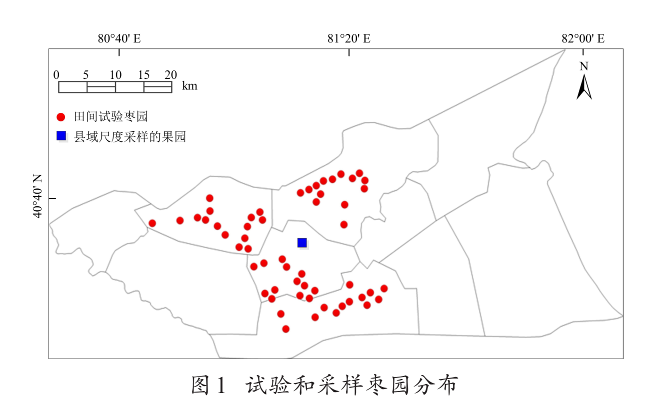


图1　试验和采样枣园分布

Fig. 1 Distribution of experimental and sampled jujube gardens

2.3 测试项目及方法

在田间试验区域测量的主要数据包括以下内容。

① 物候学发育时间：记录萌芽，开花（坐果）和成熟日期。

② 干重测量：每10 d取样一次，生长季取样10次，每次选均匀的枣树3棵，取全树叶片、新枝和果实带回实验室在80 ℃下烘干至恒重后测量各器官干重。

③ 光合有效辐射和叶面积指数：每10 d使用SunScan冠层分析仪（Delta公司，英国）测定不同冠层空间的有效叶面积指数。

④ 光合作用：每10 d测量一次，使用LI6400XT便携式光合作用测试仪分层测试净光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度和蒸腾速率。

⑤ 土壤水分：灌溉前后在0～100 cm土壤深度每20 cm用根钻取土样，测定土壤容积含水量，每年测量14次。

⑥ 其他土壤参数：土壤田持、容积密度、饱和土壤含水率、土壤水响应曲线和渗透系数等直接取样带回实验室进行测量，同步记录灌溉日期和灌溉量。

⑦ 气象数据：由塔里木大学红枣研究基地架设的小型气象站提供，包括15 min间隔的温度、湿度、辐射、风速、降雨和气压数据等。

在县域尺度观测55个枣园（图1红点坐标）的初始枣树干重、最大发育阶段的叶面积指数、最终产量和实际蒸散。叶面积指数观测时间分别为2016年7月24日和2017年7月27日，每年11月份观测枣园产量。实际蒸散量ET_a计算如公式（1）所示[20]。

$$ET_a = P_r + I - D - \Delta SM \qquad (1)$$

其中，P_r、I、D和ΔSM分别为有效降雨量、灌溉量、深层土壤渗透、生长季开始和结束时土壤平均水分含量差值。新疆地区骏枣树根系存在于0～100 cm[21]（主要分布在垂直60 cm内土层），研究中测量100 cm土壤层渗透量作为深层土壤渗透量。研究区地下水较深，地表径流量极少，所以研究中未考虑地下水和地表径流对ET_a的影响。

水分利用效率（Water Use Efficiency，WUE）是节水农业的重要指标，尤其在干旱和半干旱地区，本研究中也将使用WUE进一步验证校正模型的区域尺度模拟精度。WUE等于实测产量与ET_a的比值。

2.4 WOFOST模型参数校正

WOFOST模型参数包括气象、土壤和作物参数，由于研究区域为县域尺度，气象数据空间变异性较小，因此直接使用气象站观测数据，土壤基本属性参数直接使用测量值。本研究主要校正作物参数，对于敏感性较低的参数，如发芽的最低温度TBASEM和叶片老化的最低温度TBASE通过查阅文献[22]确定，敏感性较高的参数，如初始生物量TDWI和叶片死亡率SPAN通过2016年D1灌溉处理的田间观测数据进行校正。参考Wit等[23]的关于WOFOST模型的校准方法，结合枣树生理特点，WOFOST模型主要参数的校正过程如下。

（1）物候学参数校正。模型校准从物候学参数开始，通过有效积温法确定[23]。枣树开始发育

的最低阈值温度（Lower Threshold Temperature for Emergence，TBASEM）被设置为10 °C[22]。WOFOST给出的萌芽时最高有效温度（Max Effective Temperature for Emergence，TEFFMX）范围为18～32°C。由于2016和2017年枣树萌芽期最高温度低于30 °C，萌芽期并无高温胁迫，因此，将最高有效温度设置为30 °C。从开始发育至萌芽的有效积温和（Temperature Sum from Sowing to Emergence，TSUMEM）、萌芽至开花的有效积温和（Temperature Sum from Emergence to Anthesis，TSUM1）以及开花至成熟的有效积温和（Temperature Sum from Anthesis to Maturity，TSUM2）3个指标通过观测每日平均温度和萌芽、开花以及成熟日期进行校准。有效积温的每日增加量（Daily Increase in Temperature Sum，DTSMTB）根据最高适宜温度（35.5 °C）[24]和最低发育温度（10 °C）[22]计算。

（2）初始干重校正。枣树与一年生作物不同，如果考虑上一年的茎，可能会导致初始作物干重值过高。本研究中初始枣树干重被定义为初始新器官（初始芽和根）的重量，通过模拟和实测的总地上生物量和叶面积指数值进行初始干重TDWI的校正。县域尺度的55个果园的初始枣树干重值根据实测的芽重和芽的分配系数计算获得。其中芽的分配系数来自于田间试验的测量数据。

（3）绿叶参数校正。在所有试验小区中，萌芽时（定义为芽上第五片叶子展开时）的叶面积指数（Leaf Area Index at Emergence，LAIEM）的测量值均小于0.004。另外，仿真结果表明，当LAIEM从0.0007（WOFOST给出的最小值）增加到0.01时，总地上生物量、活叶干重、活茎干重、果实干重和LAI的模拟结果差异极小，因此，LAIEM参数可以设置为0.0007至0.01之间的任何值。测量的LAI最大相对增加量（Maximum Relative Increase in LAI，RGRLAI）均小于0.05，而且当RGRLAI从0.05增加到默认最大值0.5时，总地上生物量和叶面积指数模拟结果几乎不变，因此RGRLAI被设置为最小值0.05。叶面积与干重比值（Specific Leaf Area，SLATB）根据测量的总地上生物量和叶面积指数进行校准。叶片老化速率（Life Span of Leaves Growing at 35 Celsius，SPAN）根据生长季后期田间测量的LAI进行了校正。

（4）CO_2同化参数校准。分别在枣树最佳发育下限温度19.5 °C和上限温度35.5°C拟合光响应曲线，拟合获得最大的CO_2同化速率（Maximum Leaf CO_2 Assimilation Rate，AMAXTB）和光能利用效率（Light-use Efficiency for Single Leaf，EFFTB）初始值，再通过实测总地上生物量和叶面积指数，对消光系数（Extinction Coefficient for Diffuse Visible Light，KDIFTB）、AMAXTB和EFFTB进行了校准。

（5）干物质分配参数。FSTB（分配到茎的系数）、FOTB（分配到果实的系数）和FLTB（分配到叶的系数）为发育阶段的函数，使用测量和模拟的地上各器官干物质重量进行校准。

（6）水分利用参数校正。使用测量的土壤水分含量校正蒸腾速率修正系数（Correction Factor Transpiration Rate，CFET）、水分胁迫敏感性校正系数（Correction Factor for Crop Water Stress Sensitivity，DEPNR）、初始根深（Initial Rooting Depth，RDI）、每日根深最大增量（Maximum Daily Increase in Rooting Depth，RRI）和最大根深（Maximum Rooting Depth，RDMCR）。

2.5 模型验证

模型验证包括两部分。在田间试验区域，使用2017年D1～D5处理测量的时间序列的总地上生物量、LAI和土壤水分含量验证枣树生长和土壤水分运移的模拟精度。县域测量的55个果园最大发育阶段的LAI、单产、实际蒸散量和水分利用效率用于验证模型区域模拟性能。使用决定系数（Coefficient of Determination，R^2）、均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）和归一

化均方根误差（Normalized Root Mean Square Error，NRMSE）评估田间试验处理的模拟性能，使用 R^2，*RMSE*，*NRMSE*，相对偏差（Relative Bias Error，RBE）频率分布和变异系数（Coefficient of Variation，CV）评价县域尺度枣园的最大 LAI 和单产模拟性能。使用 *RBE* 频率分布、*RMSE* 和 *NRMSE* 评价实际蒸散和水分利用效率的模拟精度。其中，R^2 表达实测值与模拟值之间的一致性，*RMSE* 和 *NRMSE* 表达测量值和模拟值相对误差和绝对误差，$NRMSE \leqslant 10\%$ 表示极高精度，$10\% < NRMSE \leqslant 20\%$ 表示高精度，$20\% < NRMSE \leqslant 30\%$ 表示中等精度，NRMSE > 30% 表示低精度[10]。*CV* 反映了模拟结果空间变异性，$CV < 10\%$ 表示弱变异性，$10\% \leqslant CV \leqslant 100\%$ 表示中等变异性，$CV > 100\%$ 表示强变异性[10]。*RBE* 频率分布表示样本被高估和低估的比例。R^2、*RMSE*、*NRMSE*、*RBE* 和 *CV* 计算见公式（2）～（6）。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \tilde{y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}_i\right)^2} \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \tilde{y}_i\right)^2}{n}} \tag{3}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \tilde{y}_i\right)^2}{n}}}{\bar{y}_i} \tag{4}$$

$$RBE(\%) = \frac{\tilde{y}_i - y_i}{y_i} \times 100\% \tag{5}$$

$$CV = \frac{\mathrm{SD}}{\bar{y}} \times 100\% \tag{6}$$

其中，$\tilde{y}_i$ 为第 i 个样本模拟值；y_i 表示第 i 个样本测量值；$\bar{y}_i$ 表示测量样本平均值；$\bar{y}$ 表示模拟样本平均值；SD 表示模拟结果标准差；n 为样本总数，个。指标：总地上生物量，kg/ha；叶面积指数，m^2/m^2；土壤体积含水量，cm^3/cm^3；单产，kg/ha；最大叶面积指数，m^2/m^2；实际蒸散量，mm；水分利用效率，kg/m^3。

3 结果与分析

3.1 模型参数校正

根据上述模型参数校正方法，校正的枣树作物参数结果如表 1 所示。参数分别来自测量值（m）、测量值基础上的校正值（m-c）、估测值（e）、校正值（c）和文献参考值。

表 1 模型主要作物参数校正值

Table 1 Calibrated values of main crop parameters of the model

类别	参数名称	描述	值	单位	来源
萌芽参数	TBASEM	发芽的最低温度	10	°C	[22]
	TEFFMX	发芽的最高温度	30	°C	e
	TSUMEM	从开始到发芽的有效积温	230	°C	m-c
物候学参数	TSUM1	发芽到开花的有效积温	967	°C/d	m-c
	TSUM2	开花到成熟的有效积温	960	°C/d	m-c
	DTSMTB100	平均温度 10 °C 时每日有效积温	0	°C/d	[22]
	DTSMTB355	平均温度 35.5 °C 时每日有效积温	25.5	°C/d	[24]
初始参数	TDWI	萌芽时初始作物总干重	5.69～25.9	kg/ha	m
	LAIEM	萌芽时叶面积指数 LAI	0.004	——	m
	RGRLAI	LAI 每日最大增加量	0.05	d^{-1}	m
绿叶参数	SLATB000	DVS = 0 时叶面积与干重比值	0.00165	ha/kg	m-c
	SLATB55	DVS = 0.55 时叶面积与干重比值	0.0013	ha/kg	m-c
	SLATB100	DVS = 1 时叶面积与干重比值	0.0013	ha/kg	m-c

续表1

类别	参数名称	描述	值	单位	来源
	SLATB200	DVS = 2时叶面积与干重比值	0.0014	ha/kg	m-c
	SPAN	35.5°C 时叶片存活天数	40～60	d	c
	TBASE	叶片老化的最低温度	10	°C	[24]
CO_2同化参数	KDIFTB00	DVS = 0时可见光漫反射的消光系数	0.8	——	m-c
	KDIFTB200	DVS = 2时可见光漫反射的消光系数	0.8	——	m-c
	EFFTB19.5	19.5°C 时叶片光合作用效率	0.495	$kg·m^2·s/(ha·hr·J)$	m-c
	EFFTB355	35.5°C 时叶片光合作用效率	0.495	$kg·m^2·s/(ha·hr·J)$	m-c
	AMAXTB00	DVS = 0时最大CO_2同化速率	39.0	kg/(ha·hr)	m-c
	AMAXTB170	DVS = 1.7时最大CO_2同化速率	39.0	kg/(ha·hr)	m-c
	AMAXTB200	DVS = 2时最大CO_2同化速率	20.0	kg/(ha·hr)	m-c
同化物转化为生物量的效率	CVL	同化物转化到叶的效率	0.732	——	c
	CVO	同化物转化到果实的效率	0.780	——	c
	CVR	同化物转化到根的效率	0.690	——	c
	CVS	同化物转化到茎的效率	0.751	——	c
维持呼吸	Q10	温度每升高10 °C 呼吸速率相对增长率	2	$kg·CH_2O/(kg·d)$	m
	RML	叶的相对呼吸速率	0.03	$kg·CH_2O/(kg·d)$	m
	RMO	果实的相对呼吸速率	0.01	$kg·CH_2O/(kg·d)$	m
	RMR	根的相对呼吸速率	0.01	$kg·CH_2O/(kg·d)$	m
	RMS	茎的相对呼吸速率	0.015	$kg·CH_2O/(kg·d)$	m
干物质分配系数	FLTB00	DVS = 0 叶分配系数	0.67	——	m-c
	FLTB012	DVS = 0.12叶分配系数	0.31	——	m-c
	FLTB022	DVS = 0.22叶分配系数	0.41	——	m-c
	FLTB032	DVS = 0.32叶分配系数	0.55	——	m-c
	FLTB051	DVS = 0.51叶分配系数	0.40	——	m-c
	FLTB097	DVS = 0.97叶分配系数	0.15	——	m-c
	FLTB100	DVS = 1.00叶分配系数	0.1	——	m-c
	FLTB145	DVS = 1.45叶分配系数	0	——	m-c
	FLTB200	DVS = 2.00叶分配系数	0	——	m-c
	FSTB00	DVS = 0 茎分配系数	0.33	——	m-c
	FSTB012	DVS = 0.12茎分配系数	0.69	——	m-c
	FSTB022	DVS = 0.22茎分配系数	0.59	——	m-c
	FSTB032	DVS = 0.32茎分配系数	0.45	——	m-c
	FSTB051	DVS = 0.51茎分配系数	0.6	——	m-c
	FSTB097	DVS = 0.97茎分配系数	0.85	——	m-c
	FSTB100	DVS = 1.00茎分配系数	0.43	——	m-c
	FSTB145	DVS = 1.45茎分配系数	0.2	——	m-c
	FSTB200	DVS = 2.00茎分配系数	0	——	m-c
干物质分配系数	FOTB00	DVS = 0 果实分配系数	0	——	m-c
	FOTB012	DVS = 0.12果实分配系数	0	——	m-c
	FOTB022	DVS = 0.22果实分配系数	0	——	m-c
	FOTB032	DVS = 0.32果实分配系数	0	——	m-c
	FOTB051	DVS = 0.51果实分配系数	0	——	m-c

续表1

类别	参数名称	描述	值	单位	来源
	FOTB097	DVS = 0.97 果实分配系数	0	——	m-c
	FOTB100	DVS = 1.00 果实分配系数	0.47	——	m-c
	FOTB145	DVS = 1.45 果实分配系数	0.8	——	m-c
	FOTB200	DVS = 2.00 果实分配系数	1	——	m-c
死亡率	RDRSTB00	DVS = 0 茎相对死亡率	0	——	e
	RDRSTB200	DVS = 2.0 茎相对死亡率	0	——	e
	CFET	蒸腾速率校正系数	1.02	——	c
	DEPNR	作物水分胁迫敏感性校正系数	1.5	——	c
水分利用	RDI	初始根深	10	cm	m-c
	RRI	根深每日最大增量	1.2	cm/d	c
	RDMCR	最大根深	120	cm	m-c

3.2 田间验证

在田间试验区域，通过2016年测量D1处理的田间数据校正模型参数，2017年生长季内D1～D5处理的时间序列的总地上生物量、叶面积指数和土壤水分含量被用于验证模拟精度。

3.2.1 TAGP和LAI验证

TAGP和LAI模拟精度是评价枣树生长模拟过程的重要指标。表2显示了不同处理的TAGP和LAI模拟结果。校正模型模拟的D1～D3处理的TAGP与实测值一致性较好（R^2大于0.94），模拟精度较高（8.7%≤ *NRMSE*≤16.9%），模拟D4和D5处理的总地上生物量的性能低于D1、D2和D3处理，R^2为0.92，*NRMSE*约等于20%。模拟D1～D4处理LAI的一致性和精度较高，R^2大于0.9，*NRMSE*小于15%，D5处理的模拟结果略差，R^2等于0.79，*NRMSE*大于20%。表明随着灌水量的降低，水分胁迫强度将增加，校正模型对水分胁迫响应的模拟能力可能下降。总之，在70%～100%对照灌溉量时，校正模型都表现了较好的总地上生物量和叶面积指数模拟性能。

3.2.2 土壤水分含量验证

模拟和实测D1～D5处理的土壤水分含量的散点图见图2，测量值与模拟值总体趋势保持一致，模拟与实测土壤水分含量的R^2在0.29～0.75之间，*RMSE*在0.010～0.013之间，*NRMSE*在4.1%～6.1%之间。D4和D5处理的模拟和实测土壤水分含量一致性略低于D1～D3处理，R^2低于0.5。所有处理的土壤水分含量模拟精度较高，*NRMSE*均小于6.1%，绝对误差较小。

表2 总地上生物量和叶面积指数验证结果

Table 2 Validated results of TAGP and LAI

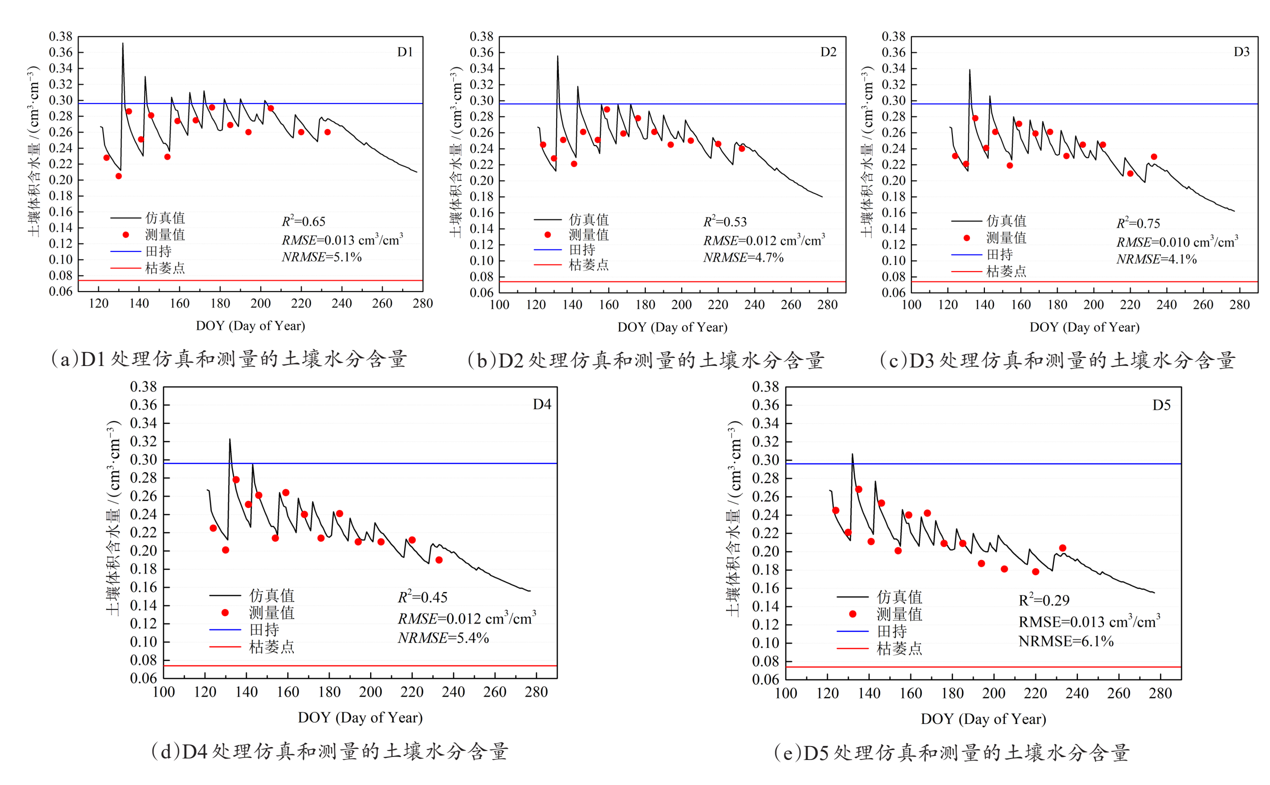
灌溉处理	TAGP验证			LAI验证		
	R^2	*RMSE*/(kg·ha^{-1})	*NRMSE*/%	R^2	*RMSE*	*NRMSE*/%
D1	0.98	672	8.7	0.97	0.13	8.3
D2	0.97	874	11.1	0.95	0.17	10.9
D3	0.94	1084	16.9	0.94	0.15	10.0
D4	0.92	1122	20.5	0.90	0.17	14.8
D5	0.92	869	19.8	0.79	0.18	21.1

综合总地上生物量、叶面积指数和土壤水分含量模拟的评价指标R^2和*NRMSE*，当灌溉量不低于经验灌溉量的80%时，模型具有较高的一致性和模拟精度。虽然在70%和60%的经验灌溉量时，模型模拟枣树生长过程总地上生物量和叶面积指数的性能略低，但最大绝对误差*NRMSE*≤21.1%，仍可以实现中等精度的模拟。在所有灌溉处理中，校正模型都表现了极高的土壤水分含量模拟精度（*NRMSE*< 10%）。

3.3 县域尺度验证

3.3.1 模拟最大LAI验证

分别输入实测55个枣园的初始枣树干重参数运行模型，55个枣园的最大LAI模拟结果散点



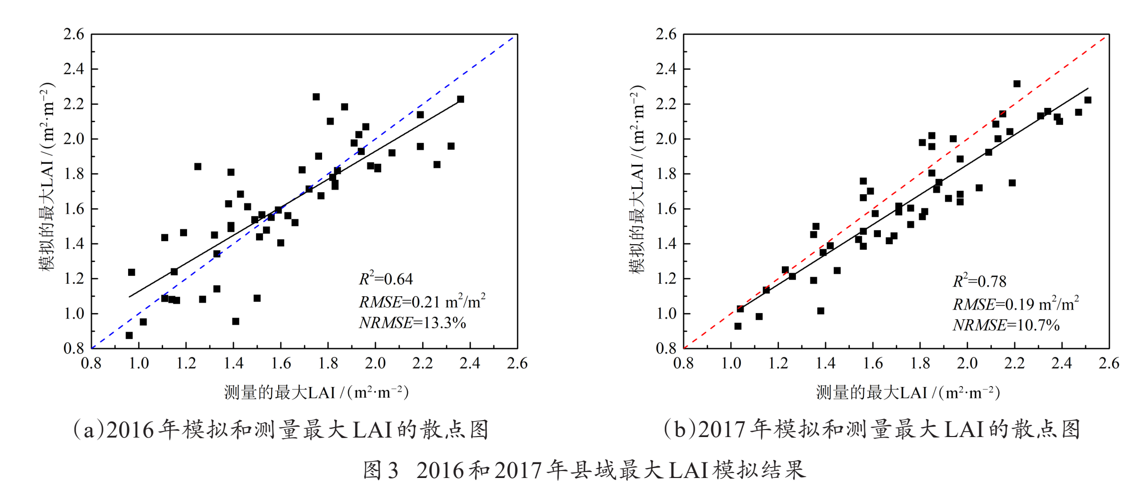
(a)D1处理仿真和测量的土壤水分含量　(b)D2处理仿真和测量的土壤水分含量　(c)D3处理仿真和测量的土壤水分含量

(d)D4处理仿真和测量的土壤水分含量　(e)D5处理仿真和测量的土壤水分含量

图2　D1～D5处理的土壤水分含量模拟结果

Fig. 2 Soil moisture simulation results for D1—D5 treatments

图见图3，2016和2017年模拟最大LAI与实测LAI的 R^2 分别为0.64和0.78，一致性较好，*NRMSE* 分别为13.3%和10.7%，模拟精度较高。模拟LAI的变异系数 *CV* 值分别等于21.6%和21.2%，表达了显著的空间变异性，也解释了初始枣树干重区域空间分布变异。



(a)2016年模拟和测量最大LAI的散点图　(b)2017年模拟和测量最大LAI的散点图

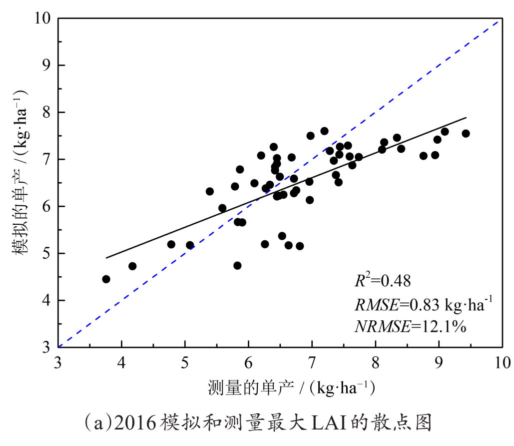
图3　2016和2017年县域最大LAI模拟结果

Fig. 3 The simulated results of the maximum LAI at county scale in 2016 and 2017

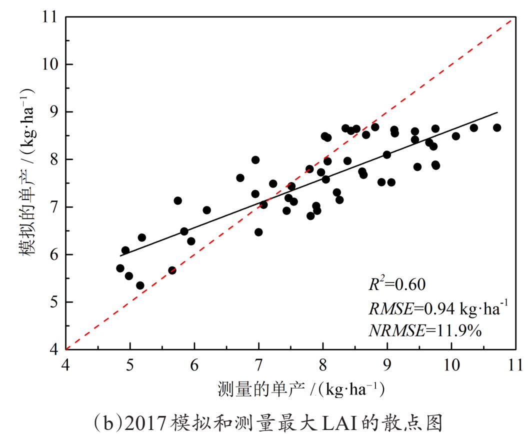
3.3.2　模拟单产验证

2016和2017年模拟与实测单产的一致性指标 R^2 分别为0.48和0.60（图4），单产预测精度 *RMSE* 分别为0.83和0.94 kg/ha，*NRMSE* 分别是12.1%和11.9%，具有较高的单产预测精度（*NRMSE*<20%）。图4也表明高产区域明显被低估，影响模拟产量的因素较多，包括 CO_2 同化参数、干物质分配、叶面积与干重比值和叶片老化

速率。本研究结果可能的原因是叶片老化速率参数设置值过低，田间试验测量的叶片老化速率值在40～60之间，县域尺度部分果园的叶片老化速率值可能高于设置的固定值50，甚至可能高于60，所以导致高产区域被低估。



（a）2016模拟和测量最大LAI的散点图

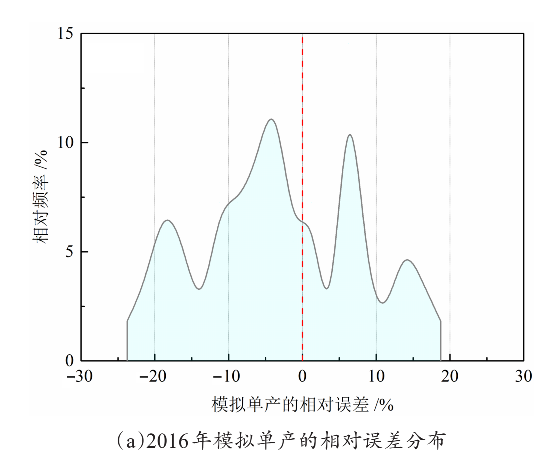


（b）2017模拟和测量最大LAI的散点图

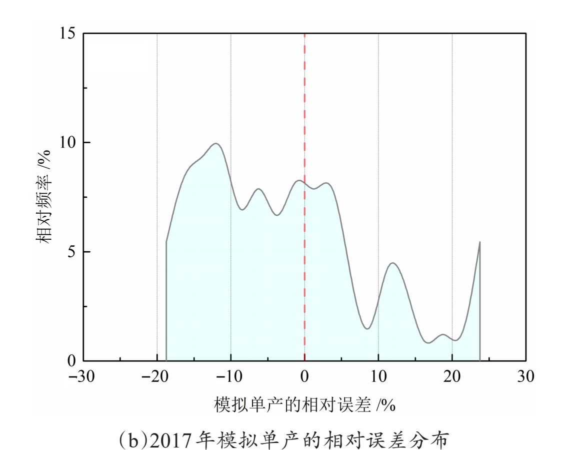
图4　2016和2017年县域单产模拟结果

Fig.4　Yield simulation results at the county scale in 2016 and 2017

单产模拟的相对误差频率分布如图5所示，大部分样本频率分布在y=0附近，平均相对误差分别为−3.23%和−2.94%，相对误差绝对值的平均值分别为9.72%和9.68%，单产预测精度较高。*CV*分别是12.5%和11.9%，具有一定产量空间分布差异，不同树龄和种植密度导致的初始枣树干重的空间异质性可能导致产量分布差异。然而，2016和2017年分别有61.8%和63.6%的样本被低估，叶片老化速率空间变异性可能是导致模拟精度下降的原因。



（a）2016年模拟单产的相对误差分布



（b）2017年模拟单产的相对误差分布

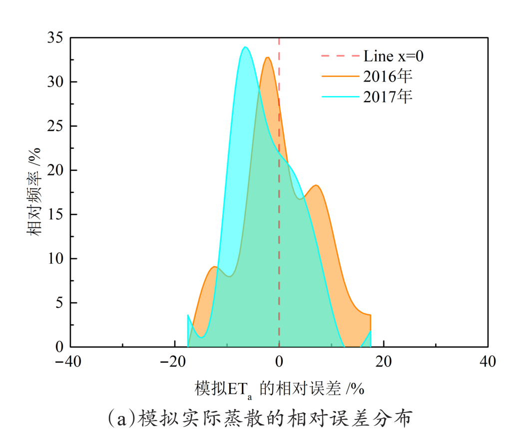
注：Bin Size=2.5，曲线平滑为B-spline

图5　模拟单产的相对误差频率分布

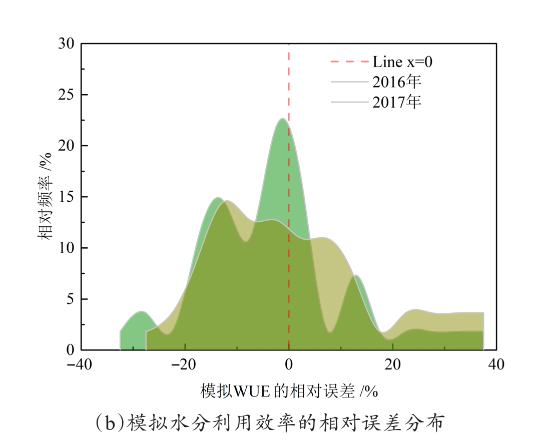
Fig. 5　Relative error frequency distribution of the simulated yield

3.3.3　模拟实际蒸散量和水分利用效率验证

模拟的55个观测果园的实际蒸散量和水分利用效率与测量值的相对百分比误差频率分布如图6所示。所有果园的实际ET_a模拟误差小于20%，其中49个果园的模拟误差小于10%。2016和2017年模拟ET_a均方根误差分别为36.1 mm（7.9%）和30.8 mm（7.4%）（表3），表现了极高的模拟精度（$NRMSE$<10%）。2016年模拟ET_a平均相对误差略高于测量值，2017年低于测量值，平均相对误差的绝对值分别为6.44%和5.98%，



(a)模拟实际蒸散的相对误差分布



(b)模拟水分利用效率的相对误差分布

图 6 模拟实际蒸散和水分利用效率的相对误差频率分布

Fig. 6 Relative error frequency distribution of the simulated ET_a and WUE

校正模型的整体ET_a模拟精度较高。模拟的WUE相对误差略低于ET_a，在2016和2017年两个生长季，模拟WUE的相对百分比误差小于10%的样本分别占50.9%和47.3%，小于20%的分别占85.5%和80%，最大值分别为37.4%和38.3%。2016年模拟WUE的平均相对误差低于测量值，2017年略高于测量值，平均相对误差的绝对值分别为11.39%和12.73%。校正的模型表现了较高的WUE模拟精度（10%<*NRMSE*<20%），*RMSE*值分别为0.23和0.28 kg/m³。

表3 模拟实际蒸散和水分利用效率的验证指标

Table 3 Validated indices of the simulated actual evapotranspiration and WUE

参数	年	*RMSE*	*NRMSE*/%	*MBE*/%	绝对误差平均值*MAE*/%
ET_a	2016	36.1 mm	7.9	0.68	6.44
	2017	30.8 mm	7.4	−2.80	5.98
WUE	2016	0.23 kg/m³	15.3	−3.23	11.39
	2017	0.28 kg/m³	14.8	0.68	12.73

注：MBE为相对误差的平均值

4 讨 论

4.1 田间尺度模拟精度分析

田间尺度验证结果表明，基于时间序列的总地上生物量和叶面积指数的模拟结果均达到中等精度以上，土壤水分含量达到极高的模拟精度。然而，D1～D3的模拟性能略高于D4和D5处理，说明校正的模型随着灌溉量的降低、水分胁迫的增强，模拟精度可能呈现下降的趋势。原因可能是研究中仅仅使用2016年D1处理数据校正模型参数，D1处理接近潜在水分供应，2017年D1～D3处理灌溉量大于80%CK，与2016年D1处理的灌溉量差异不大，枣树面临水分胁迫较小，对枣树产量影响也较小。D4和D5处理可能导致更严重的干旱胁迫，实际生产中对枣树生长的影响可能高于模拟过程的干旱胁迫修正结果，进而导致总地上生物量和LAI的模拟误差。LAI的模拟偏差也将导致D4和D5处理的枣树蒸腾和土壤蒸发的计算误差，进而导致土壤水分含量模拟精度略低于D1～D3处理。

另外，在大田试验过程中，枣树生长通常会收到施肥、病虫害、风、热胁迫等因素影响。在本研究中，模型无法响应这些因素对枣树生长的影响，在已校正的枣树生长模型中耦合经典的氮素运移模块或病虫害响应模型有望进一步提高模拟精度和机理性。

4.2 模型区域尺度应用的不确定性

在运行WOFOST作物生长模型进行生长模拟和产量评估时，输入参数、气象驱动数据的不确定性以及模型模拟过程的简化都会影响单产估算的准确性[25]。本研究预期模拟误差主要来自输入参数的不确定性，初始枣树干重参数强烈影

响农作物的初始生长速率，并显示出高度的不确定性，这可能会影响初始LAI和最大LAI的生长速率[26]，进而影响生长模拟和单产评估精度。通过实测55个果园的初始枣树干重值驱动模型在县域尺度模拟最大LAI和单产精度较高，说明县域尺度的枣园初始枣树干重空间异质性较大。在已报道的研究中，当使用相同树龄果园的初始枣树干重平均值驱动模型时，181个区域枣园的单产验证*NRMSE*为16.3%（2016年）和17.2%（2017年）[19]，明显高于本研究中的12.1%和11.9%的验证误差，这也说明初始枣树干重为枣树生长模拟过程的高敏感参数。另外，尽管决定叶片衰老速率和时间的叶片老化速率参数主要取决于作物遗传学特性，但该参数也受干旱、营养胁迫、病虫害以及作物管理等因素的影响[27]。但WOFOST模型无法模拟这些因素对叶片老化速率的影响[28]。研究中为叶片老化速率设置一个固定值（50）无法表达所有55个样本的实际叶片老化或损伤情况，模拟最大LAI的误差最可能来自于叶片老化速率的空间分布误差。在以往研究中，通过遥感反演LAI同化潜在模式的WOFOST模型可以降低初始枣树干重和叶片老化速率的不确定性，提高区域尺度的枣树单产模拟精度，集合卡尔曼滤波EnKF和SUBPLEX算法同化遥感反演LAI后模拟单产的*NRMSE*分别为9.2%和8.3%[29]。表明初始枣树干重和叶片老化速率为区域尺度枣树生长模拟的不确定性参数，遥感同化方法可以被考虑降低这一不确定性。

另外，区域尺度的土壤属性的空间异质性也会导致最大LAI和水分运移过程的模拟精度。同化遥感反演的LAI和ET_a状态变量可以降低土壤水分含量模拟的不确定性，进而提高产量评估精度。因此，县域尺度单产和蒸散量模拟误差可能来自灌溉、施肥和修剪管理导致的初始枣树干重、叶片老化速率和土壤属性参数的不确定性。在今后的研究中，可通过遥感同化土壤水分、蒸发蒸腾和叶面积指数等状态变量对区域尺度的初始枣树干重、叶片老化速率和土壤属性参数进行校正，提高区域尺度模拟精度，为在区域尺度分析水分胁迫对枣树生长和产量的影响提供机理性模拟模型。

5 结 论

本研究以WOFOST模型为基础，以县域尺度的枣树生长模拟和水分利用评价为目标，使用田间实测枣树生理生化指标和土壤理化数据校正模型参数。在田间试验果园获得了较高的TAGP和LAI模拟精度（8.3%≤*NRMSE*≤21.1%），以及极高的土壤水分含量模拟精度（4.1%≤*NRMSE*≤6.1%）。使用校正的模型和55个果园测量的初始枣树干重驱动模型进行了县域尺度的枣树生长模拟和水分使用评价。结果表明，2016和2017年模拟最大LAI和单产的*NRMSE*均小于20%，实现了较高的模拟精度。校正模型也表现了极高的ET_a模拟精度（*NRME*<10%）和较高的WUE模拟精度（*NRMSE*<20%）。总之，在田间和区域尺度的枣园，WOFOST模型都表现了较为理想的枣树生长模拟精度和水分利用评价性能，可为分析气象、土壤、灌溉管理和枣树生长耦合影响提供一种新思路。

参考文献：

[1] 国家统计局. 数据查询[EB/OL]. [2021-06-07]. http://www.stats.gov.cn/.

[2] 胡家帅, 郑旭荣, 王振华, 等. 不同滴灌灌水处理对南疆沙区红枣产量及品质的影响[J]. 节水灌溉, 2016 (9): 40-43.
HU J, ZHENG X, WANG Z, et al. Effects of different drip irrigation treatment on yield and quality in southern Xinjiang sand jujube[J]. Water Saving Irrigation, 2016 (9): 40-43.

[3] WANG J, JUN H, WU P, et al. Effects of soil managements on surface runoff and soil water content in jujube orchard under simulated rainfalls[J]. Catena, 2015, 135: 193-201.

[4] WANG Z, BIAN Q, ZHANG J, et al. Optimized water and fertilizer management of mature jujube in Xinjiang arid area using drip irrigation[J]. Water (Switzerland), 2018, 10(10): ID 1467.

[5] DAI Z, FEI L, HUANG D, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitro-

gen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 146-154.

[6] 王振华, 扁青永, 李文昊, 等. 南疆沙区成龄红枣水肥一体化滴灌的水肥适宜用量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 96-104.
WANG Z, BIAN Q, LI W. Suitable water and fertilizer amount for mature jujube with drip-irrigation under fertigation in southern Xinjiang sandy area[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 96-104.

[7] 扁青永, 王振华, 胡家帅, 等. 水肥供应对南疆沙区滴灌红枣生理、生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 165-171.
BIAN Q, WANG Z, HU J. Effects of water and fertilizer supply on physiology, growth and yield of drip-irrigation jujube in the southern Xinjiang sandy area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 165-171.

[8] DE WIT A, BOOGAARD H, FUMAGALLI D, et al. 25 years of the WOFOST cropping systems model[J]. Agricultural Systems, 2019, 168: 154-167.

[9] EWERT F, RÖTTER R.P, BINDI M, et al. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change[J]. Environmental Modelling and Software, 2015, 72: 287-303.

[10] 黄健熙, 贾世灵, 马鸿元, 等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 222-228.
HUANG J, JIA S, MA H. Dynamic simulation of growth process of winter wheat in main production areas of China based on WOFOST model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 222-228.

[11] 闫铃. 基于CERES-Wheat模型的小麦生长发育过程模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
YAN L. Simulation of wheat growth and development process based on the CERES-Wheat model[D]. Yang ling: Northwest A&F University, 2020.

[12] FISHMAN S, GÉNARD M. A biophysical model of fruit growth: Simulation of seasonal and diurnal dynamics of mass[J]. Plant, Cell & Environment, 1998, 21: 739-752.

[13] LOPEZ G, FAVREAU R R, SMITH C, et al. L-PEACH: A computer-based model to understand how peach trees grow[J]. Horttechnology, 2010, 20: 983-990.

[14] LESCOURRET F, BLECHER N, HABIB R, et al. Development of a simulation model for studying kiwi fruit orchard management[J]. Agricultural Systems, 1999, 59: 215-239.

[15] GREEN S, MCNAUGHTON K, WÜNSCHE J N, et al. Modeling light interception and transpiration of apple tree canopies[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(6): 1380-1387.

[16] COSTES E, SMITH C, RENTON M. MAppleT: Simulation of apple tree development using mixed stochastic and biomechanical models[J]. Functional Plant Biology, 2008, 35: 936-950.

[17] 董智强, 王萌萌, 李鸿怡, 等. WOFOST模型对山东省夏玉米发育期与产量模拟的适用性评价[J]. 作物杂志, 2019(5): 159-165.
DONG Z, WANG M, LI H. Applicability assessment of WOFOST model of growth and yield of summer maize in Shandong province[J]. Crops, 2019(5): 159-165.

[18] KULIG B, BARBARA S, AGNIESZKA K, et al. The use of the WOFOST model to simulate water-limited yield of early potato cultivars[J]. Agronomy, 2020, 10 (1): ID 81.

[19] BAI T, WANG T, ZHANG N, et al. Growth simulation and yield prediction for perennial jujube fruit tree by integrating age into the WOFOST model[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(3): 721-734.

[20] DAI Z, FEI L, HUANG D, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 146-154.

[21] 李朝阳, 王兴鹏, 杨玉辉. 滴灌带铺设模式对成龄枣树根系再分布及产量的影响[J]. 灌溉排水学报. 2021, 40(5): 1-7.
LI Z, WANG X, YANG Y. Location of drip irrigation tapes affects root redistribution and yield of mature jujube[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 (5): 1-7.

[22] 孙爱良. 气温变化对黄骅市冬枣生产的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(6): 88-91.
SUN A. Effect of temperature change on winter jujube production in Huanghua city[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(6): 88-91.

[23] DE WIT A, BOOGAARD H, SUPIT I. System description of the WOFOST 7.2. cropping system model[EB/OL]. [2021-05-15]. https://www. wur. nl/en/Research-Results/Research-Institutes/Environmental-Research/Facilities-Tools/Software-models-and-databases/WOFOST/Documentation-WOFOST.htm

[24] 王庆江, 温陟良, 贾彦丽. 赞皇大枣幼树叶片光合特性的研究[J]. 河北农业大学学报, 2002(S1): 120-121.
WANG Q, WEN S, JIA Y. Study on the photosynthetic characteristics of young Jujube[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2002(S1): 120-121.

[25] HUANG J, JOSE L G, HUANG H, et al. Assimilation of remote sensing into crop growth models: Current

status and perspectives[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276-277: ID 107609.
[26] BAI T, WANG S, BENOIT MERCATORIS, et al. Assimilation of remotely-sensed LAI into WOFOST model with the SUBPLEX algorithm for improving the field-scale jujube yield forecasts[J]. Remote Sensing, 2019, 11(16): ID 1945.
[27] HUANG J, TIAN L, LIANG S, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 106-121.
[28] CURNEL Y, DE WIT A J W, DUVEILLER G, et al. Potential performances of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on an OSS experiment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 1843-1855.
[29] BAI T, WANG S, MERCATORIS B, et al. Assimilation of remotely-sensed LAI into WOFOST model with the SUBPLEX algorithm for improving the field-scale jujube yield forecasts[J]. Remote Sensing, 2019, 11(16): ID 1945.

Dynamic Simulation of Jujube Tree Growth and Water Use Evaluation Based on the Calibrated WOFOST Model

BAI Tiecheng[1*], WANG Tao[1], ZHANG Nannan[1,2]

（1. *College of Information Engineering/Southern Xinjiang Research Center Information Technology in Agriculture*, *Tarim University*, *Alaer* 843300, *China*; 2. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*）

Abstract: Irrigation schemes determined based on statistical analysis of field trials are usually only applicable to specific soils and meteorological environments. It is difficult to quantitatively analyze the impact of irrigation strategies on the growth of jujube trees. In order to realize the quantitative analysis of the influence of temperature, light and water resources on the growth of fruit trees, WOrld FOod Studies (WOFOST) model parameters were calibrated to simulate the jujube tree growth and water migration process. Firstly, the observed data obtained from field trials in 2016 and 2017 were used to calibrate the phenology development, initialization, green leaf, CO_2 assimilation, dry matter partitioning, respiration, and water use parameters of the WOFOST model. Secondly, the time series of total above-ground biomass, leaf area index (LAI) and soil moisture content in field trials were dynamically simulated, and accuracy verification and analysis were also performed. Finally, the maximum LAI, yield, actual evapotranspiration (ET_a) and water use efficiency (WUE) data of 55 orchards were employed to evaluate the performance of the calibrated model at the county scale. The results showed that the coefficient of determination R^2 of TAGP simulated in the field test area was between 0.92 and 0.98, and the normalized root mean square error (NRMSE) was between 8.7% and 20.5%, the R^2 of simulated LAI ranged from 0.79 to 0.97, and the *NRMSE* ranged from 8.3% to 21.1%. The R^2 of the simulated soil moisture content was between 0.29 and 0.75, and the *NRMSE* ranged from 4.1% and 6.1%. The model could well simulate the time series of jujube tree growth dynamics and soil moisture content changes. At the county scale, the R^2 between the simulated and measured maximum LAI were 0.64 and 0.78, and the *NRMSE* were 13.3% and 10.7% in 2016 and 2017, respectively. The simulated yield showed R^2 value of 0.48 and 0.60, and *NRMSE* of 12.1% and 11.9%, respectively. *RMSE* of the simulated versus measured ET_a were 36.1 mm (7.9%) and 30.8 mm (7.4%), respectively. The model also showed high WUE simulation accuracy (10%<*NRMSE*<20%) with *RMSE* values of 0.23 and 0.28 kg/m^3 in 2016 and 2017, respectively. In short, WOFOST model achieved accurate simulation of jujube tree growth and water transport at the field and county scales, which may provide new ideas for the quantitative and mechanism analysis of the coupled effects of soil, weather, irrigation management and jujube tree growth.

Key words: crop growth model; parameter calibration; WOFOST; jujube tree; water use efficiency